

DOI: 10.15593/2499-9873/2018.1.03

УДК 621.731.003

**Е.В. Кузнецова**

Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, Пермь, Россия

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРЕССОВАНИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ**

Рассматривается моделирование процессов прессования осесимметричных металлоизделий при изготовлении прутков и труб. Моделирование выполняется в условиях наиболее благоприятной схемы напряженного состояния – преимущественно в условиях неравномерного трехосного сжатия. При разработке модели технологических операций поперечные размеры заготовки выбраны исходя из минимально допустимой вытяжки, обеспечивающей получение оптимальных механических свойств изделия и их однородность по сечению и длине. При этом используются накопленные практические данные с учетом основных параметров процесса прессования – скорости прессования (скорость движения пуансона прессы) и скорости истечения (величина, определяющая скоростные условия на выходе из очага матрицы).

**Ключевые слова:** прессование, технологические остаточные напряжения, неравномерность и степень пластической деформации, скорость истечения металла, усилие прессования, вытяжка, сопротивление деформации.

**E.V. Kuznetsova**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

## **MODELLING OF PROCESS OF PRESSING OF AXISYMMETRIC HARDWARE TAKING INTO ACCOUNT TECHNOLOGICAL PARAMETERS**

In work modeling of processes of pressing of axisymmetric hardware at production of bars and pipes is considered. Modeling is carried out in the conditions of the optimum scheme of a tension - mainly in the conditions of uneven three-axis compression. When developing model of technological operations the cross amount of preparation is chosen, proceeding from minimum admissible extract providing optimum mechanical properties of a product and their uniformity on the section and length. Thus the saved-up practical data taking into account key parameters of process of pressing - pressing speeds (speed of the movement of a punch of a press) and the expiration speed (the size defining high-speed conditions at the exit from a matrix point) are used.

**Keywords:** pressing, technological residual stresses, unevenness and extent of plastic deformation, metal expiration speed, effort of pressing, extract, deformation resistance.

В процессе производства металлоизделий прессованием напряженно-деформированное состояние в элементарных объемах характеризуется компонентами тензора деформаций, отличающимися в поперечном и продольном направлениях прессования. Неравномерность деформации имеет место и возрастает от осевых слоев к периферийным и по длине заготовки. Исключением является прессование круглых прутков, где деформированное состояние можно моделировать как осесимметричное. После выхода металлоизделий из пластической зоны в объеме заготовки формируется система самоуравновешенных остаточных напряжений, возникших вследствие неравномерности пластических деформаций [1–3]. Моделирование процесса формирования остаточного напряженно-деформированного состояния с учетом технологических параметров прессования является актуальной задачей, решение которой позволит в процессе изготовления выбирать параметры изготовления таким образом, чтобы минимизировать нежелательные остаточные напряжения, т.е. снизить их уровень и степень влияния на качество металлоизделий [4–6].

Прессованием получают изделия не только из сравнительно малопластичных материалов, но и из металлов с высокими пластическими свойствами, что объясняется рядом преимуществ данного вида обработки.

По условиям неразрывности среды скорость прессования  $v_{пр}$  и скорость истечения  $v_{ис}$  связаны между собой следующей зависимостью:

$$v_{ис} = \lambda v_{пр}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – вытяжка, что указывает на непосредственную связь степени деформации со скоростными условиями процесса [7].

Поскольку степень деформации определяет упрочнение, а тепловой эффект прессования вместе с длительностью пребывания металла в очаге деформации определяет разупрочнение, то это дает основание считать, что скорость прессования (и скорость истечения) вполне определенно влияет на сопротивление деформированию и на общее усилие прессования. Изменяя скорость прессования, получают различные виды течения металла (различные виды очага деформации), а это приводит к получению разнообразных результатов прессования. Следовательно, скорость прессования может определенным образом влиять и на качество продукта обработки.

Как указывалось, прессование характеризуется неравномерностью течения металла, что приводит к неоднородности механических свойств по сечению готового изделия. Существенно влияет на равномерность течения металла через очко матрицы уменьшение перепада температуры между слитком или заготовкой и стенками инструмента. Поэтому инструмент перед прессованием рекомендуется подогревать до определенных температур, не допуская потерь необходимых механических свойств материала инструмента.

Практически все технологические процессы изготовления металлопродукции связаны с появлением в изделиях остаточных напряжений, причина возникновения которых связана преимущественно с неравномерной пластической деформацией по сечению. Одни слои металла растягиваются в большей степени, чем другие, и после разгрузки в них возникают остаточные напряжения сжатия, в других – менее деформируемых слоях – возникают растягивающие остаточные напряжения. При горячей обработке давлением на неоднородное поле деформаций накладывается неравномерное температурное поле, возникающее при охлаждении изделий.

Определить остаточные напряжения, возникающие в результате действия фазовых превращений, весьма сложно, так как они всегда связаны с наличием неравномерного температурного поля и, как следствие, температурных остаточных напряжений.

Таким образом, для практики необходимо знать законы возникновения остаточных напряжений и их зависимость от технологических параметров, для того чтобы в процессе изготовления избежать нежелательных остаточных напряжений либо уменьшить их настолько, чтобы их влияние не отражалось на качестве изделий.

Процесс прессования чаще всего изучают по изменению координатной сетки, нанесенной на плоскостях образца, разрезанного по оси и плотно сложенного этими плоскостями перед прессованием. Анализ изменения координатной сетки показал, что область деформации при прессовании не всегда имеет одинаковую протяженность: она может быть сосредоточена вблизи матрицы и может распространяться по длине заготовки иногда на всю ее длину. В силу этого течение металла при прессовании отличается большой неравномерностью, которая определяется режимом обработки (вытяжкой, температурой и скоростью деформации), условиями контактного трения, природными свойствами материала.

При прессовании пластическая зона распространяется почти на весь объем заготовки, но интенсивная (основная) деформация металла происходит в обжимающей части пластической зоны (рис. 1). Во всех участках деформируемого объема окружные и радиальные главные деформации практически равны между собой. Этим определяется равенство окружных и радиальных главных нормальных напряжений:  $\sigma_{\theta} = \sigma_r$ .

На всех участках прессуемого объема пластической зоны, кроме обжимающей части,  $\sigma_l > \sigma_r$ , а в обжимающей части  $\sigma_l < \sigma_r$ , так как в обжимающей части главная деформация – это уменьшение поперечного сечения, которое происходит под действием наибольших напряжений, т.е.  $\sigma_r$ . Тогда условие пластичности для обжимающей части определяется уравнением  $\sigma_r = \sigma_T + \sigma_l$ .

Усилие прессования (усилие на пуансон)  $P$  складывается из следующих основных составляющих [8]:

1) усилия, затрачиваемого на формоизменение металла в обжимающей части;

2) усилия, затрачиваемого на перемещение частиц металла в пластической зоне, т.е. в объеме слитка вне обжимающей части,  $P_{\text{п}}$ ;

3) усилий на преодоление трения по контактными поверхностям контейнера  $T_{\text{к}}$ , иглы  $T_{\text{иг}}$  (при прессовании труб) и матрицы  $T_{\text{м}}$ .

Полное усилие прессования определяется как сумма всех составляющих:  $P = P_{\text{ф}} + P_{\text{п}} + T_{\text{к}} + T_{\text{м}} + T_{\text{иг}}$  (при прессовании прутков и профилей  $T_{\text{иг}} = 0$ ).

Напряжение, связанное с формоизменением металла, определяется уравнением вида

$$P_{\text{ф}} = A\sigma_T\sqrt{K} \ln \lambda, \quad (2)$$

где  $\ln \lambda$  – интегральный показатель деформации;  $A$  – коэффициент, зависящий от параметров очага деформации (диаметр контейнера, размер прессуемого изделия, размер обжимающей части и пластической зоны);  $\sqrt{K}$  – геометрически усредненный коэффициент упрочнения металла, учитывающий также неравномерность деформации.

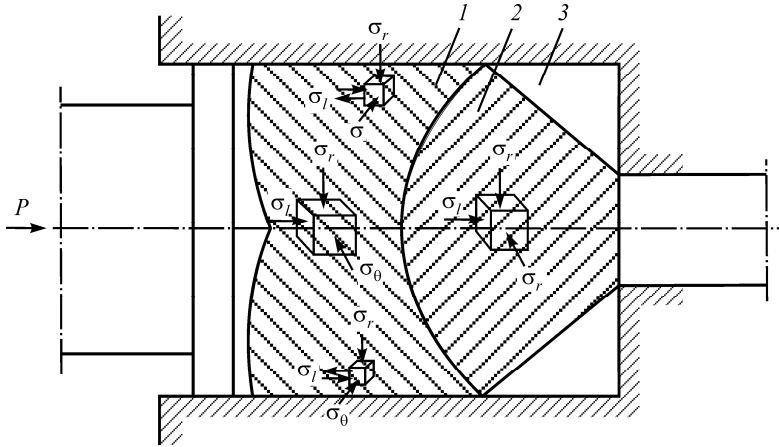


Рис. 1. Схема напряженного состояния металла при прессовании: 1 – пластическая зона деформации; 2 – обжимающая часть пластической зоны; 3 – недеформируемые зоны (мертвые углы)

С известным приближением можно считать, что напряжение формоизменения  $P_\phi$  равно минимальному напряжению прессования  $P_{\min}$  (напряжение на пуансоне).

Для оптимального выбора основных технологических параметров рассмотрим процесс прессования заготовки круглого профиля.

Для оценки усилия прессования  $P$  используется разрывное поле скоростей истечения деформированного материала [6] (рис. 2).

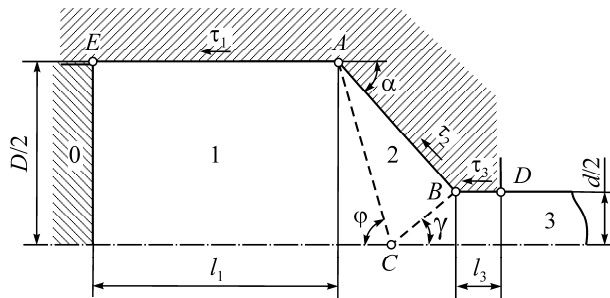


Рис. 2. Кинематически допустимое поле из жестких зон 0, 1, 2 и 3

Используем разрывное поле скоростей истечения деформируемого материала для оценки усилия прессования  $P$ . Такое поле, показанное на рис. 2, кинематически допустимо, следовательно, можно найти верхнюю оценку  $P$ . Здесь «0» обозначен инструмент.

Скорость сдвига:  $v_{01}$  – на границе зоны 1 и контейнера 0;  $v_{02}$  – на границе зоны 2 и матрицы 0;  $v_{03}$  – на границе зоны 3 и пояса матрицы;  $v_{12}$  – на стыке зон 1 и 2;  $v_{23}$  – на стыке зон 2 и 3.

Тогда касательные напряжения на границах зон 0,1; 0,2; 0,3 и зон 1,2 и 2,3 ( $\tau_{12} = \tau_{23} = k$ ) соответственно определяются в виде

$$\left. \begin{aligned} \tau_1 &= f_1 k; \\ \tau_2 &= f_2 k; \\ \tau_3 &= f_3 k, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $f_1, f_2, f_3$  – коэффициенты трения;  $k = 1,15\sigma_s$ ,  $\sigma_s$  – сопротивление деформации материала.

В условиях плоского прессования мощности  $N$ , развиваемые на тех же границах:

$$\left. \begin{aligned} N_{01} &= v_{01} l_1 \tau_1 = v_{01} l_1 f_1 k; \\ N_{02} &= v_{02} AB \tau_1 = v_{02} \left[ \left( \frac{D}{2} - \frac{d}{2} \right) / \sin \alpha \right] f_2 k; \\ N_{03} &= v_{03} l_3 \tau_3 = v_{03} l_3 f_3 k; \\ N_{12} &= v_{12} ACk = v_{12} \left[ \frac{D}{2} / \sin \varphi \right] k; \\ N_{23} &= v_{23} BCk = v_{23} \left[ \frac{D}{2} / \sin \theta \right] k. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Здесь  $l_1, l_3$  – длина и ширина матрицы;  $AB, AC, BC, \alpha, \varphi, \theta$  – геометрические параметры инструмента;  $D$  и  $d$  – диаметры заготовки до и после прессования.

Мощность на пресс-шайбе

$$N = p v_0 D / 2,$$

где  $p$  – давление на пресс-шайбе;  $v_0$  – скорость прессования.

Тогда с учетом (2) давление на пресс-шайбе определяется в виде

$$p = (N_{01} + N_{02} + N_{03} + N_{12} + N_{23}) v_0 D / 2.$$

С учетом (4)

$$p/2k = 0,5 \left[ f_1 \frac{l_1}{D/2} + f_2 \frac{\lambda - 1}{\lambda \sin \alpha} \cdot \frac{v_{02}}{v_0} + f_3 \frac{l_3}{D/2} \cdot \frac{v_{03}}{v_0} + \frac{1}{\sin \varphi} \cdot \frac{v_{12}}{v_0} + \frac{1}{\lambda \sin \theta} \cdot \frac{v_{23}}{v_0} \right], \quad (5)$$

где  $\lambda$  – вытяжка,  $\lambda = D/d$ .

Скорости сдвига определяются графически с помощью годографа (рис. 3, а). Из произвольного полюса 0 проводится линия параллельно оси  $x$ . На ней откладывается вектор  $v_{01}$ , равный  $v_0$ . Из конца вектора  $v_{01}$  (точка 1) проводится линия параллельно границе  $AC$  зон 1 и 2. Из полюса проводится линия параллельно границе  $AB$  зон 0 и 2. Точка пересечения 2 дает значение векторов  $v_{02}$  и  $v_{12}$ . Из точки 2 проводится линия параллельно границе  $BC$  зон 2 и 3. Из полюса проводится линия параллельно оси  $x$ . Точка пересечения 3 дает значения векторов  $v_{03} = v_3$  и  $v_{23}$ . Из условия несжимаемости следует, что  $v_3 / v_0 = \lambda$ .

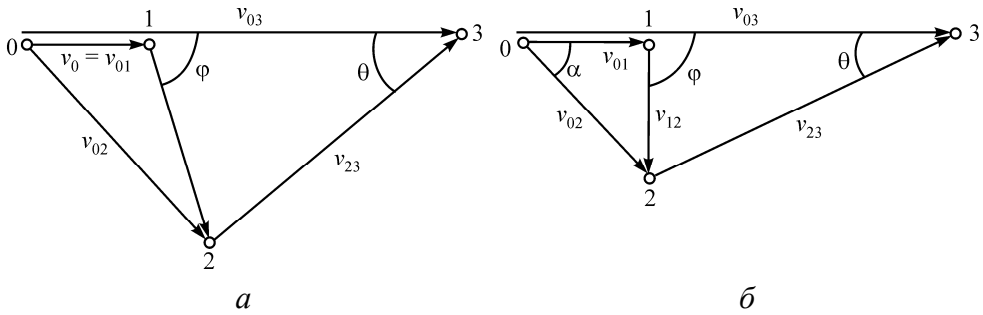


Рис. 3. Годограф скоростей при произвольном значении  $\varphi$  (а) и при  $\varphi = 90^\circ$  (б)

На рис 3, б построен годограф для  $\varphi = 90^\circ$ . Здесь соотношения для численных значений (модулей) векторов скоростей имеют вид

$$v_{02}/v_0 = 1/\sin \alpha; \quad v_{03}/v_0 = \lambda; \quad v_{12}/v_0 \sin \varphi = \tan \alpha; \quad v_{23}/v_0 \sin \theta = \tan \alpha. \quad (6)$$

После подстановки выражение примет вид

$$p/2k = 0,5 \left[ f_1 \frac{l_1}{D/2} + f_2 \frac{\lambda - 1}{\lambda \sin^2 \alpha} + f_3 \frac{l_3}{D/2} + \frac{\lambda - 1}{\lambda} \tan \alpha \right]. \quad (7)$$

Разрывное поле из жестких зон и годограф скоростей для обратного плоского прессования показаны на рис. 4. Зависимость мощности на пресс-шайбе от суммарной мощности, развиваемой на границах зон при сдвиге, в условиях обратного плоского прессования имеет вид

$$p(D/2 - d/2)v_3 \leq N_{01} + N_{12} + N_{13} + N_{23}. \quad (8)$$

Зона 0 предполагается неподвижной, и трение металла о стенку контейнера не участвует в расчете, так как мощность трения покоя равна нулю. При прочих равных условиях усилие обратного прессования меньше усилия прямого прессования.

Проанализировав выражения (5) и (7) с учетом соотношений (3) и (8), можно сделать заключение о том, что наибольшее давление наблюдается в начале прямого прессования (при максимуме  $l_1$ ). Давление увеличивается с ростом сил трения  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_3$  и сопротивления деформации  $\sigma_s$ ; давление растет при увеличении вытяжки  $\lambda$  и для прямого и для обратного процесса.

Выбрать оптимальное сочетание параметров можно, уточнив значение  $\varphi$ , мощности, и усилие прессования. Условие, при котором завышение  $p/\sigma$  минимально, имеет вид

$$(\partial\theta/\partial\varphi)(N_{AB} + N_{AC} + N_{BC}) = 0. \quad (9)$$

Мощности трения  $N_{01}$  и  $N_{03}$  не зависят от  $\varphi$ , поэтому не суммируются при интегрировании. При вычислении производной по  $\varphi$  предварительно найдем выражение угла  $\theta$  через  $D$ ,  $d$ ,  $\alpha$  и  $\varphi$ .

Рассмотрим прессование круглого прутка. Из формулы (7) получим для прямого прессования круглого прутка следующее соотношение [7]:

$$\frac{p}{\sigma_s} = \frac{\tau_1}{\sigma_s} \cdot \frac{4l_1}{D} + \left( \frac{1}{1 + \cos \alpha} + \frac{\tau_2 / \sigma_s}{\sin \alpha} \right) \ln \lambda^2 + \frac{\tau_3}{\sigma_s} \cdot \frac{4l_3}{d}, \quad (10)$$

где  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_3$  – напряжение трения о стенку контейнера, конус и поясок матрицы;  $l_1$  и  $l_3$  – длина слитка и ширина пояска матрицы;  $D$  и  $d$  – диаметр слитка и прутка;  $\sigma_s$  – среднее сопротивление деформации.

Для обратного прессования в формуле (11) отсутствует первое слагаемое, в которое входит  $l_1$ . Тогда (11) принимает вид

$$\frac{p}{\sigma_s} = \left( \frac{1}{1 + \cos \alpha} + \frac{\tau_2 / \sigma_s}{\sin \alpha} \right) \ln \lambda^2 + \frac{\tau_3}{\sigma_s} \cdot \frac{4l_3}{d}. \quad (11)$$



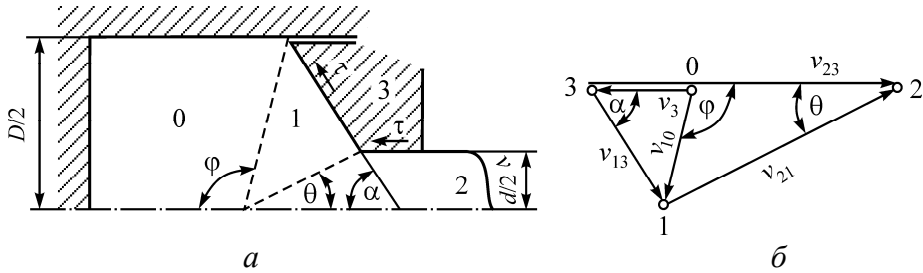


Рис. 4. Поле (а) и годограф скоростей (б) обратного плоского прессования

Зная соотношения между усилием прессования и основными геометрическими параметрами, можно найти параметры процесса. С учетом (10) найдем угол матрицы, минимизирующий усилие прессования по формуле

$$\frac{\partial}{\partial \alpha} (p/\sigma_s) = \frac{\partial}{\partial \alpha} \left( \frac{1}{1 + \cos \alpha} + \frac{\tau_2/\sigma_s}{\sin \alpha} \right) = 0 \quad (12)$$

или

$$\frac{1}{(1 + \cos \alpha)^2} - \frac{\tau_2}{\sigma_s} \operatorname{tg} \alpha = 0.$$

Например, решив это уравнение при значении  $\frac{\tau_2}{\sigma_s} = 0,3$ , получим

оптимальный угол наклона образующей канала матрицы  $\alpha = 52^\circ$ . Другими словами, минимальное усилие на пуансон при коэффициенте трения 0,3 будет при угле матрице, равном  $52^\circ$ .

На рис. 5 показаны значения углов матрицы, минимизирующие усилие прессования для различных коэффициентов трения.

Из формул (11) и (12), домножив обе части на  $\sigma_s$ , найдем необходимое усилие для прямого и обратного прессования круглого прутка соответственно:

$$p = \tau_1 \cdot \frac{4l_1}{D} + \left( \frac{\sigma_s}{1 + \cos \alpha} + \frac{\tau_2}{\sin \alpha} \right) \ln \lambda^2 + \tau_3 \cdot \frac{4\lambda l_3}{D}, \quad (13)$$

$$p = \left( \frac{\sigma_s}{1 + \cos \alpha} + \frac{\tau_2}{\sin \alpha} \right) \ln \lambda^2 + \tau_3 \cdot \frac{4\lambda l_3}{D}. \quad (14)$$

Входящее в соотношения (14) и (15) сопротивление деформации  $\sigma_s$  для металлов и сплавов определяется в виде

$$\sigma_s = \sigma_{s_0} + m\varepsilon^n, \quad (15)$$

где  $\sigma_s$  – сопротивление материала пластической деформации;  $\sigma_{s_0}$  – предел текучести материала;  $m$  и  $n$  – эмпирические коэффициенты упрочнения материала [9–13].

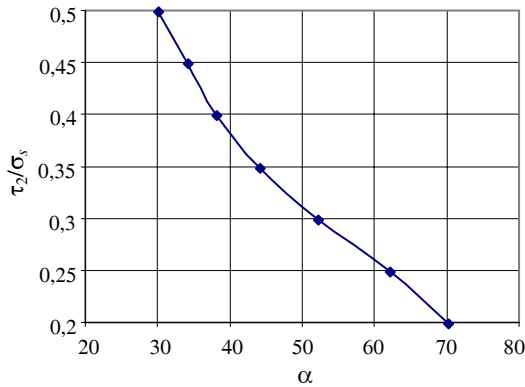


Рис. 5. Зависимость углов матрицы от коэффициента трения

В выражении (15)  $\varepsilon$  – это степень пластической деформации, которая для процесса прессования определяется следующим образом:

$$\varepsilon = \ln D/d = \ln \lambda, \quad (16)$$

где  $\lambda$  – коэффициент вытяжки при прессовании [14].

Тогда выражения (13) и (14) с учетом (15) и (16) примут вид:

$$p = \tau_1 \cdot \frac{4l_1}{D} + \left( \frac{\sigma_{s_0} + m\varepsilon^n}{1 + \cos \alpha} + \frac{\tau_2}{\sin \alpha} \right) \ln \lambda^2 + \tau_3 \cdot \frac{4\lambda l_3}{D}, \quad (17)$$

$$p = \left( \frac{\sigma_{s_0} + m\varepsilon^n}{1 + \cos \alpha} + \frac{\tau_2}{\sin \alpha} \right) \ln \lambda^2 + \tau_3 \cdot \frac{4\lambda l_3}{D}. \quad (18)$$

На рис. 6 в качестве примера показаны зависимости силы давления Пуансона от угла наклона образующей матрицы  $\alpha$  при прямом прессовании прутков из стали 45 (а), 30ХГСА (б), титанового сплава ВТ 1-1 (в). Значение вытяжки  $\lambda$  варьировалось от 5 до 10.

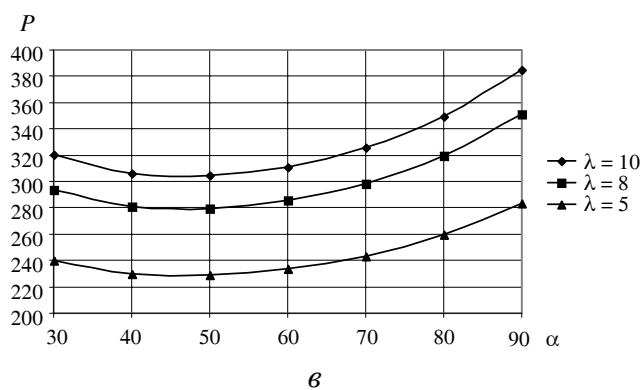
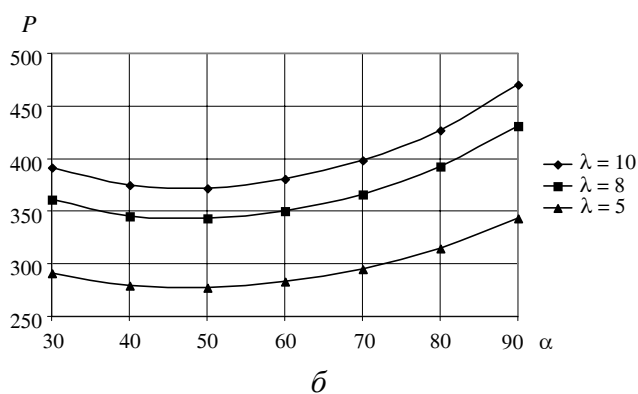
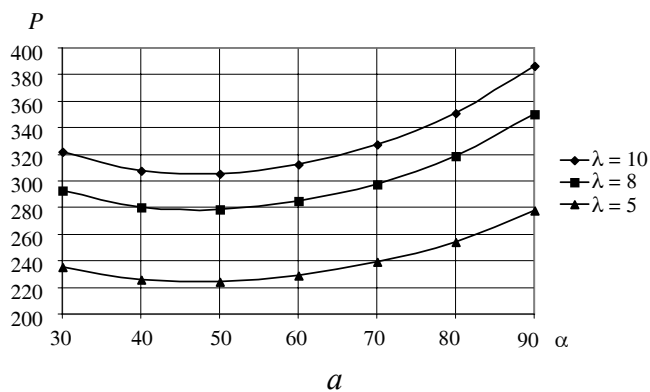


Рис. 6. Зависимость силы давления пуансона от угла наклона матрицы при прямом прессовании прутка: а – из стали 45; б – стали 30ХГСА; в – титана VT 1-1

Таким образом, в работе представлена методика учета геометрии осесимметричных металлоизделий и технологических параметров с целью уменьшения усилий прессования, а значит, понижения энергозатрат при прессовании. Также методика позволяет оптимизировать

соотношения технологических параметров при обработке различных металлов и сплавов, для того чтобы минимизировать влияние неравномерности пластических деформаций при прессовании и избежать формирования нежелательных остаточных напряжений [15].

### Список литературы

1. Wang X., Gong X., Chou K. Review on powder-bed laser additive manufacturing of Inconel 718 parts // Proc. ASME 2015 International Manufacturing Science and Engineering Conference, American Society of Mechanical Engineers. – P. V001T001A002.

2. Withers P., Bhadeshia H. Residual stress. Part 1 – measurement techniques // Materials science and Technology. – 2001. – No. 17(4). – P. 355–365.

3. Liu W., Kong F., Kovacevic R. Residual Stress Analysis and Weld Bead Shape Study in laser welding of high strength steel // Proc. ASME 2013 International Manufacturing Science and Engineering Conference collocated with the 41st North American Manufacturing Research Conference, American Society of Mechanical Engineers. – P. V001T001A053–V001T001A053.

4. Indentation method to measure the residual stress induced by ion implantation / Q. Wang, K. Ozaki, H. Ishikawa, S. Nakano, H. Ogiso // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2006. – Vol. 242(1–2). – P. 88–92.

5. Denlinger E.R., Heigel J.C., Michaleris P. Residual stress and distortion modeling of electron beam direct manufacturing Ti-6Al-4V // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. – 2014. – P. 0954405414539494.

6. Kolmogorov G.L., Kuznetsova E.V. Method for calculating the limiting technological residual stresses in a tubular billet // Russian metallurgy (Metally). – 2017. – Т. 2017, № 4. – С. 237–239.

7. Обработка металлов давлением / Ю.Ф. Шевакин, В.Н. Чернышев, Р.Л. Шаталов, Н.А. Мочалов. – М.: Интермет Инжиниринг, 2005. – 496 с.

8. Перлин И.Л., Райтбарг Л.Х. Теория прессования металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 448 с.

9. Колмогоров В. Л., Орлов С.И., Колмогоров Г.Л. Гидродинамическая подача смазки. – М.: Металлургия, 1975. – 256 с.

10. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1986. – 689 с.

11. Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В., Тиунов В.В. Технологические остаточные напряжения их влияние на долговечность и надежность металлоизделий. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. – 226 с.

12. Остаточные напряжения при прессовании осесимметричных металлоизделий / Е.В. Кузнецова, Г.Л. Колмогоров, В.Н. Трофимов, А.Ю. Вавель // Сборник научных трудов Sworld. – Вып. 2, т. 2. – Одесса: КУПРИЕНКО СВ., 2014. – С. 52–54.

13. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. – Екатеринбург: Изд-во УПИ, 2001. – 836 с.

14. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.

15. Кузнецова Е.В. Предельные режимы деформирования прутков и труб с учетом остаточных напряжений // Научное обозрение. – 2013. – № 1. – С. 97–101.

### **References**

1. Wang X., Gong X. and Chou K. Review on powder-bed laser additive manufacturing of Inconel 718 parts," Proc. ASME 2015 International Manufacturing Science and Engineering Conference, American Society of Mechanical Engineers, p. V001T001A002.

2. Withers P., Bhadeshia H., 2001, Residual stress. Part 1–measurement techniques / Materials science and Technology, 17(4), pp. 355-365.

3. Liu W., Kong F., and Kovacevic R. Residual Stress Analysis and Weld Bead Shape Study in laser welding of high strength steel," Proc. ASME 2013 International Manufacturing Science and Engineering Conference collocated with the 41st North American Manufacturing Research Conference, American Society of Mechanical Engineers, pp. V001T001A053-V001T001A053.

4. Wang Q., Ozaki K., Ishikawa H., Nakano S. and Ogiso, H., 2006, "Indentation method to measure the residual stress induced by ion implantation," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 242(1–2), pp. 88-92.

5. Denlinger E.R., Heigel J.C. and Michaleris P. 2014, "Residual stress and distortion modeling of electron beam direct manufacturing Ti-6Al-4V," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, p. 0954405414539494.

6. Kolmogorov G.L., Kuznetsova E.V. Method for calculating the limiting technological residual stresses in a tubular billet / Russian metallurgy (Metally). 2017. Vol. 2017. № 4. P. 237-239.

7. Shevakin Ju.F., Chernyshev V.N., Shatalov R.L., Mochalov N.A. Obrabotka metallov davleniem. [Processing of metals pressure]. M.: Intermet Inzhiniring, 2005, 496 p.

8. Perlin I.L., Rajt barg L.H. Teorija pressovaniya metallov [Theory of pressing of metals]. M.: Metallurgija, 1975, 448 p.

9. Kolmogorov V.L., Orlov S.I., Kolmogorov G.L. Gidrodinamicheskaja podacha smazki [Gidro dynamic supply of greasing]. M.: Metallurgija, 1975, 256 p.

10. Kolmogorov V.L. Mehanika obrabotki metallov davleniem. [Mekhanik of processing of metals pressure]. M.: Metallurgija, 1986, 689 p.

11. Kolmogorov G.L., Kuznecova E.V., Tiunov V.V. Tehnologicheskie ostatochnye naprjazhenija ih vlijanie na dolgovechnost' i nadjozhnost' metalloizdelij. [Technological residual stresses their influence on durability and reliability of hardware]. Perm': Izd-vo Perm. nac. issled. politehn. un-ta, 2012. 226 p.

12. Kuznecova E.V., Kolmogorov G.L., Trofimov V.N., Vavel' A.Ju. Ostatochnye naprjazhenija pri pressovanii osesimetricnyh metalloizdelij [Residual tension when pressing axisymmetric hardware] / Sbornik nauchnyh trudov SWORLD. Vypusk 2, Vol 2. Odessa: KUPRIENKO SV. 2014, P. 52-54.

13. Kolmogorov V.L. Mehanika obrabotki metallov davleniem. [Mekhanik of processing of metals pressure]. Ekaterinburg: Izd-vo UPI, 2001, 836 p.

14. Storozhev M.V., Popov E.A. Teorija obrabotki metallov davleniem. M.: Mashinostroenie. 1977. 423 p. Teorija obrabotki metallov davleniem [Theory of processing of metals pressure]. M., Mashinostroenie, 1977. 423 p.

15. Kuznecova E.V. Predel'nye rezhimy deformirovaniya prutkov i trub s uchetom ostatochnyh naprjazhenij [The limit modes of deformation of

bars and pipes taking into account residual tension] Nauchnoe obozrenie. Scientific review 2013. № 1. P. 97-101.

Получено 16.02.2018

### **Об авторе**

**Кузнецова Елена Владимировна** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Динамика и прочность машин» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: mellen75@mail.ru).

### **About the author**

**Elena V. Kuznetsova** (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Dynamic and Strength of Machines, Perm State National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: mellen75@mail.ru).